

大河津分水路新第二床固の段階施工計画の 数値解析技術(Q3D-FEBS)による改善

IMPROVEMENT OF THE STAGED CONSTRUCTION PLAN FOR THE
GROUNDSILL OF THE OHKOUZU DIVERSION CHANNEL THROUGH
NUMERICAL ANALYSIS TECHNIQUE (Q3D-FEBS)

竹村吉晴¹・福岡捷二²・福島雅紀³

Yoshiharu TAKEMURA, Shoji FUKUOKA and Masaki FUKUSHIMA

¹正会員 博士(工) 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

²フェロー Ph.D. 工博 中央大学研究開発機構 (〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27)

³正会員 博士(工) 国土交通省 信濃川河川事務所 所長 (〒940-0098 新潟県長岡市信濃1-5-30)

大河津分水路では、流下能力の不足する河口部の拡幅と第二床固の改築が進められている。これらの工事が実施される河口部では河床に軟岩が露出しており、現況の第二床固下流では軟岩河床の侵食により、河床が著しく低下し、各種の対策が繰り返されてきた経緯がある。著者らは、これまでの検討から第二床固下流区間の軟岩河床は、7m/s以下の底面流速では著しい侵食は生じないことを知見として得ている。この知見と非静水圧準三次元解析に基づいて、令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工計画の改善について検討が進められている。本論文は、その検討過程の詳細を提示することにより、河川横断構造物の設計及び段階施工計画の検討に対する数値解析技術の有効性を示す。

Key Words: Ohkouzu diversion channel, groundsill, staged construction, numerical analysis technique, Q3D-FEBS

1. 序論

図-1に示す大河津分水路は、越後平野を洪水氾濫から守るために建設され、大正11年に通水が開始された。河口までの距離をそれまでの約60kmから約9kmにショートカットしたことから、大河津分水路には床固・床留が数多く築造されており、最下流に位置する第二床固は河床安定の要として大きな役割を果たしている。大河津分水路では、分派地点の川幅が約720mであるのに対し、河口部の川幅は約180mと狭く流下能力が不足している。さらに、通水から100年が経過し施設の老朽化が懸念さ

れることから、山地掘削による河道拡幅(約100m)と第二床固の改築(新第二床固の建設と第二床固の切下げ)による大規模な改修工事が進められている¹⁾。

改修工事が進められる河口部には、寺泊層と呼ばれる軟岩が河床に露出している。現況の第二床固下流では、洪水流による軟岩河床の侵食により河床が著しく低下し、各種の対策が講じられてきた経緯がある²⁾。しかし、洪水流による軟岩侵食の機構については不明な部分が多く、新第二床固の設計等を進める上での大きな課題になっていた。常山らの研究²⁾によると、バップルピアの投入以降(平成2年～平成5年)、第二床固周辺の河床低下は抑制されている。平成23年7月洪水では、当時の既往最大流

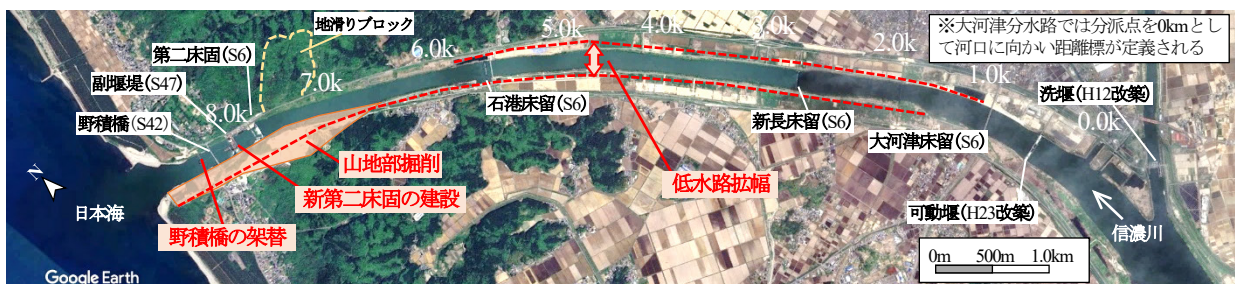
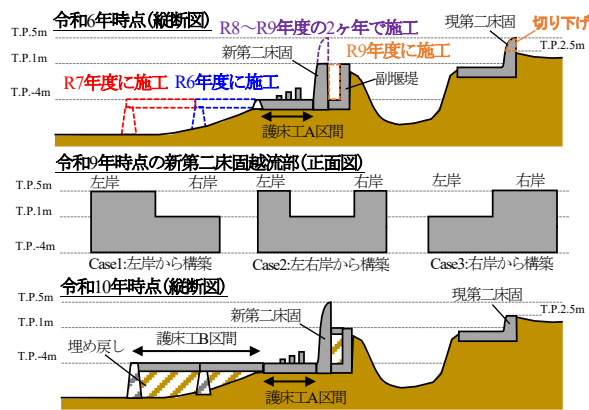


図-1 大河津分水路の航空写真(2024年)と改修工事の項目



(a) 第二床固周辺の斜め写真(R4.5.16撮影)



(b) 令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工検討の模式図(令和4年時点)

▼の時点の河道を対象に洪水時の流況を解析した。R9年は越流部の構築手順毎に3ケース解析した。

		H27	H28	H29	H30	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20
掘削工	山地掘削																								
	低水路掘削																								
新第二床固建設・既設構造物の切り下げ	現況河道部で新第二床固施工																								
	河道拡幅部で新第二床固施工																								
																※現第二床固の切り下げ									
野積橋架替																令和4年時点の検討フロー									

(c) 大河津分水路改修事業の工程(令和4年時点)

図-2 大河津分水路改修事業の工程と令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工検討の模式図

量(8,300m³/s)が観測されたにも関わらず、第二床固周辺で大規模な河床洗掘は確認されていない。著者らは、平成23年7月洪水前後に実施されたナローマルチビーム測量の結果と、平成23年7月洪水の再現計算及び水理模型実験の結果³⁾を詳細に分析し、現況の第二床固下流の軟岩河床及び新第二床固が建設される副堰堤下流の軟岩河床は、7m/s以下の底面流速では著しい侵食は生じないことを知見として得た。これにより、洪水流による軟岩河床の侵食に対して工学的な判断基準を持ち、新第二床固の設計等を行えるようになった。

従来、河川横断構造物の設計等は、水理模型実験を中心に検討されてきた。水理模型実験は実現性に触れることができ、現象の理解に役立つ大きな利点を持つが、実験施設の規模、模型製作及び計測に多くの時間と労力を要する点に課題がある。近年は、非静水圧準三次元解析や三次元解析等のより高度な数値解析技術の開発、利用環境の整備が進み、実際に近い流れの計算が工学的に十分な精度と所要時間で出来るようになってきている。このため、河川の広い範囲を対象に時空間的に詳細な流れ場を検討でき、条件変更が容易な数値解析を検討の軸に据え、数値解析の検証及び導かれた結果の確認に水理模型実験を用いることで、両者の利点を活かし、河川横断構造物の設計及び段階的な施工計画の検討をより合理的に行えるものと期待される⁴⁾。

著者らは非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS⁵⁾)に基づき、大河津分水路における洪水時の観測水面形、大型水理模型実験による新第二床固の越流部及び減勢区間の三次元流況を説明可能な数値解析モデルを構築してきた。そして、構築した数値解析モデルと上述した軟岩河床の侵食に対する知見に基づき、新第二床固の設計及び段階

施工計画の検討を信濃川河川事務所と協働で進めてきた。本論文では、令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工計画を例に検討の詳細を提示し、数値解析技術が河川横断構造物の設計及び段階施工計画の検討に有効であることを示す。

2. 新第二床固の段階施工計画と数値解析技術の

適用において留意したこと

(1) 新第二床固の段階施工計画(令和4年時点)

図-2に令和4年時点の大河津分水路改修事業の工程と令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工検討の模式図を示す。新第二床固は越流部と護床工で構成される(図-2(b))。図-2(c)に示すように、現況河道部で新第二床固の施工がなされた後、河道拡幅部で新第二床固の施工が進められる。現況河道部での施工が完了する令和9年度までは現況川幅のまま工事が行われるため、河道や構造物に対する負荷が工期を通じて最も大きくなる。

本研究では、図-2(b)に示す新第二床固の越流部が既存の副堰堤の天端高(T.P.1m)まで構築され、3列のバツルピアを要する護床工A区間が完成した令和6年時点から、現況河道部で越流部(堤頂T.P.5m)が完成する令和10年時点までの期間を対象として、各施工段階(図-2(c)の▼)で想定される洪水流況を数値解析から詳細に調べ、段階施工計画の改善点等について検討する。新第二床固の越流部は令和8年度と令和9年度の2ヶ年でTP.5mまで構築される。このため、令和9年河道については、越流部を左岸から構築する場合(Case1)、左右岸から構築す

表-1 洪水流況解析の条件

計算格子数	158,146 (739×214)
計算刻み時間(秒)	0.001
計算所要時間(1ケース当たり)	約6日

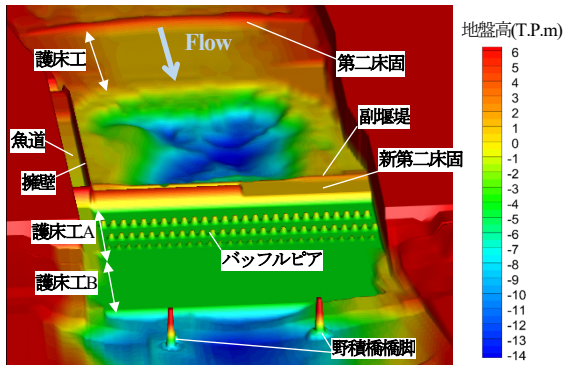


図-3 新第二床固周辺の解析地形(令和9年河道(Case3))

る場合(Case2)、右岸から構築する場合(Case3)の3ケース検討し、越流部の構築手順について検討する。

(2) 数値解析技術の活用において留意したこと

新第二床固の改修工事の影響は、河口から大河津分水路全体に及ぶ。現況の第二床固より上流区間では、早期の水位低下を望む一方、現況川幅のまま水位が極端に低下した場合、河床低下が進行し第二床固上流の右岸山地部(図-1)における地滑りの誘発、既存の床留群の安全性の低下が懸念される。段階施工河道の水理模型実験(縮尺1/100)は、施設の制約もあり4.2km~8.8km+河口部200mの範囲で行われたが(全長約50m)、数値解析では、上述の点についても併せて検討するため、分派点(0km)から河口の約10km区間を解析範囲とした。

洪水流況解析には、非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS)⁹⁾を使用した。表-1に洪水流況解析で使用した計算格子と計算刻み時間、計算所要時間を整理している。図-3は、令和9年河道(Case3)の新第二床固周辺の解析地形を三次元表示している。洪水流況を詳細に把握するため、新第二床固に付属する3列のバフフルピア、魚道、擁壁、新第二床固下流に位置する野積橋の橋脚について、地形条件として解析に取り込むようにした(最小で0.75mの計算格子幅)。粗度係数は、平成23年洪水、平成29年洪水、令和元年洪水の再現計算を実施し、観測水位・流量を良好に説明する一定値を用いた。

著者らは、Q3D-FEBSを新第二床固の大型水理模型実験(1/30縮尺)に適用し、越流部及び跳水を伴う減勢区間の流れを良好に説明出来ることを確認している⁹⁾。この経験から、越流部の流れを精度良く計算するには、最低でも越流部の天端を縦断方向に3分割する程度の計算格子を用いる必要があることを知見として得ている。これを参考に第二床固及び新第二床固の天端部と斜面部の形状を再現した。外力条件は、上流端に既往最大流量9,800m³/s(令和元年10月洪水の氾濫戻し流量)、下流端には新第二床固下流の軟岩河床の侵食に対する危険側の条

件として朔望平均干潮位(T.P.0.3m)を境界条件としてそれぞれ与えた。なお、計算は固定床で行い、冒頭で述べた7m/sを基準として軟岩河床の侵食危険性を検討した。

表-1の計算所要時間は、上流端の流量を1時間に2,000m³/sずつ増加させ、流量が9,800m³/sに達した後、9,800m³/sを3時間通水して跳水位置や床固上流の水位などが時間的にほぼ変わらない、安定した流れの状態が形成されるまでに要した時間である。計算には九州大学のスーパーコンピューターITOのサブシステムA(CPU: Intel Xeon Gold 6154 (3.0 GHz (Turbo 3.7 GHz), 18 core)×2)を使用し、OpenMPによる36コアの並列計算を実施した。

3. 新第二床固の段階施工計画の数値解析技術による改善

新第二床固の各施工段階における洪水流況解析の結果を以下の(1)~(3)の視点から分析した。これらを踏まえた段階施工計画の改善について(4)に示す。

(1) 第二床固より上流区間における水面形の変化

図-4は、流量9,800m³/s流下時の現況河道及び各施工段階の解析水面形を示している。令和6年の時点で新第二床固の越流部がT.P.1mまで構築されるため、図-4(a)に示すように、段階施工河道では副堰堤の直上流の水位が現況河道より上昇する。令和8年までは洪水流が第二床固を完全越流するため、第二床固より上流区間の水位は、その影響をほとんど受けない。一方、令和9年は、図-2に示したように新第二床固の越流部の一部がT.P.5mまで構築されるため、副堰堤の直上流の水位が過年度よりも上昇する。その結果、洪水流が第二床固を不完全越流し、第二床固より上流区間の水位が現況河道よりも上昇することになる。図-4(b)に示す6.4kmより上流の有堤区間において、現況河道からの水位上昇量は最大で5cm程度、石港床留(5.6km)より上流区間では1cm以下である。令和10年は、新第二床固の越流部が全幅でT.P.5mまで構築されると同時に、第二床固がT.P.5mからT.P.2.5mまで切り下げられるため、現況河道よりも水位が低下するが、図-4(b)に示すように影響は短い範囲に限定される。

このことから、新第二床固の段階施工が第二床固より上流区間の流下能力、第二床固上流の右岸山地部の地滑り、既存の床留群に及ぼす影響は小さいと推察される。

(2) 新第二床固より下流区間における流況の変化

新第二床固より下流区間では、①段階施工に伴う洪水流況の変化が河岸際の工作物及び野積橋に悪影響を及ぼさないか、②現況河道と接続する護床工端部での対策、護床工直下流の深掘れ部で洗掘が生じて護床工の安定性を損ねることはないかに着目し、各施工段階における洪水流況を分析した。その結果を表-2のように整理した。

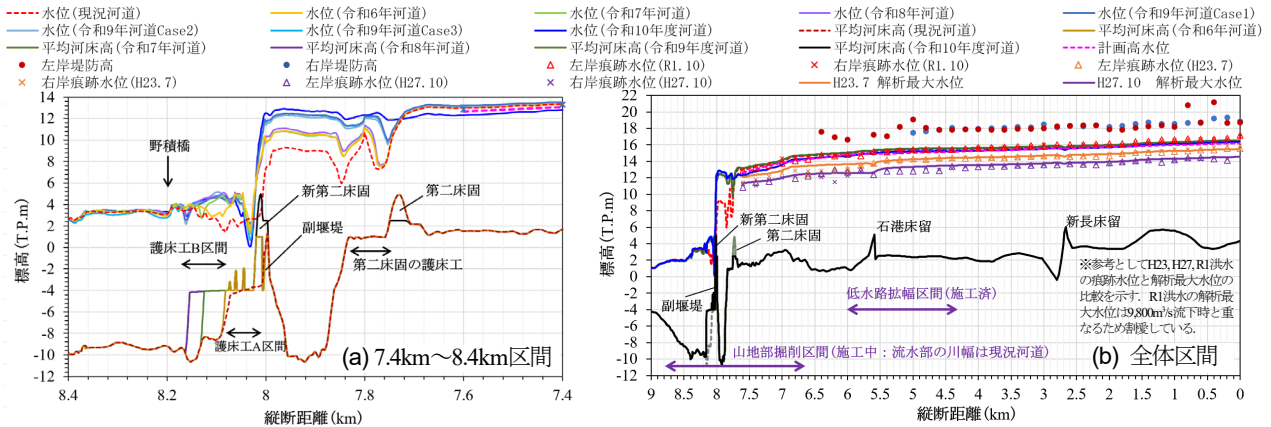
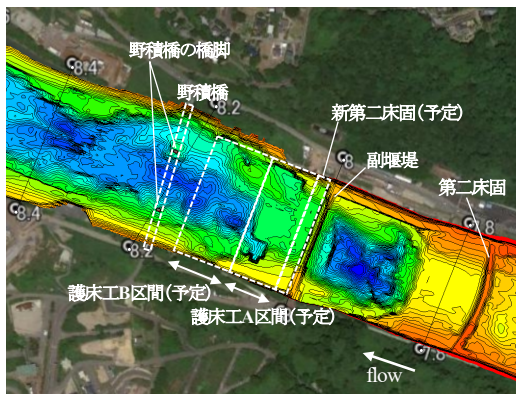


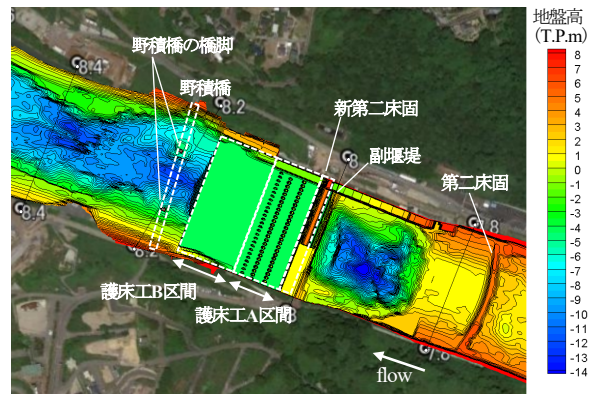
図4 流量9,800m³/s流下時の現況河道及び各施工段階における解析水面形

表-2 新第二床固の段階施工河道における洪水流況解析の分析結果

	河岸付近の工作物付近の流況	野積橋橋脚付近における底面流速の現況河道からの変化	護床工端部の最大流速、深掘れ部における底面流速の現況河道からの変化
令和6年河道	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(7m/s以上の流速発生)	護床工端部: 約11.7 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和7年河道	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(7m/s以上の流速発生)	護床工端部: 約10.4 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和8年河道	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(9m/s以上の流速発生)	護床工端部: 約10.1 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和9年河道 (Case1) (左岸から構築)	右岸際で7m/s以上の流速が発生	右岸:現況河道と同程度の底面流速 左岸:底面流速が増大(7m/s以下の流速発生)	護床工端部: 約11.0 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和9年河道 (Case2) (両岸から構築)	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(7m/s以下の流速発生)	護床工端部: 約12.5 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和9年河道 (Case3) (右岸から構築)	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(9m/s以上の流速発生)	護床工端部: 約11.0 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下
令和10年河道	7m/s以上の流速は発生しない	右岸:底面流速が低下 左岸:底面流速が増大(7m/s以上の流速発生)	護床工端部: 約9.9 m/s 深掘れ部: 底面流速が低下

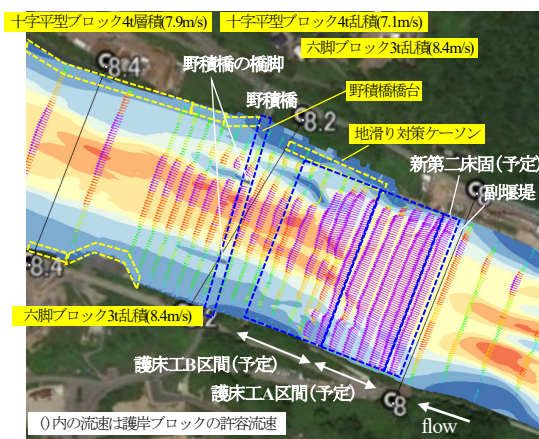


(a) 現況河道の地形コンター

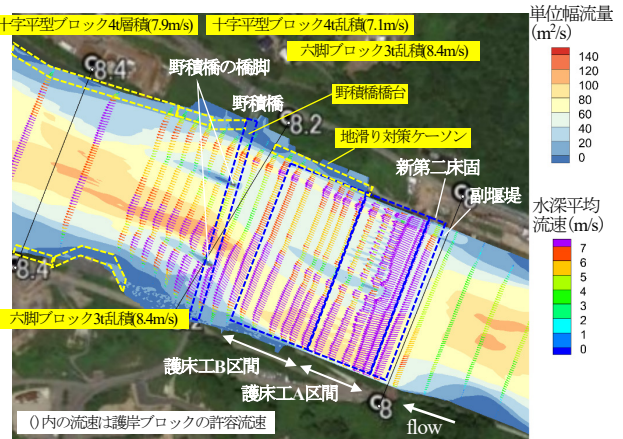


(b) 令和9年河道 (Case3) の地形コンター

図5 現況河道と令和9年河道 (Case3) の第二床固及び新第二床固周辺の解析地形



(a) 現況河道の洪水流況解析結果



(b) 令和9年河道 (Case3) の洪水流況解析結果

図6 現況河道と令和9年河道 (Case3) の新第二床固周辺の洪水流況解析結果

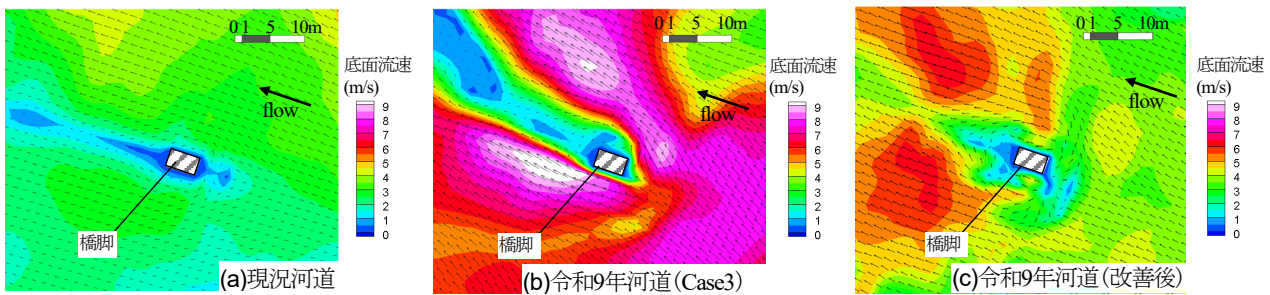


図-7 現況河道，令和9年河道(Case3)，令和9年河道(改善後)の野積橋の左岸橋脚付近における底面流速

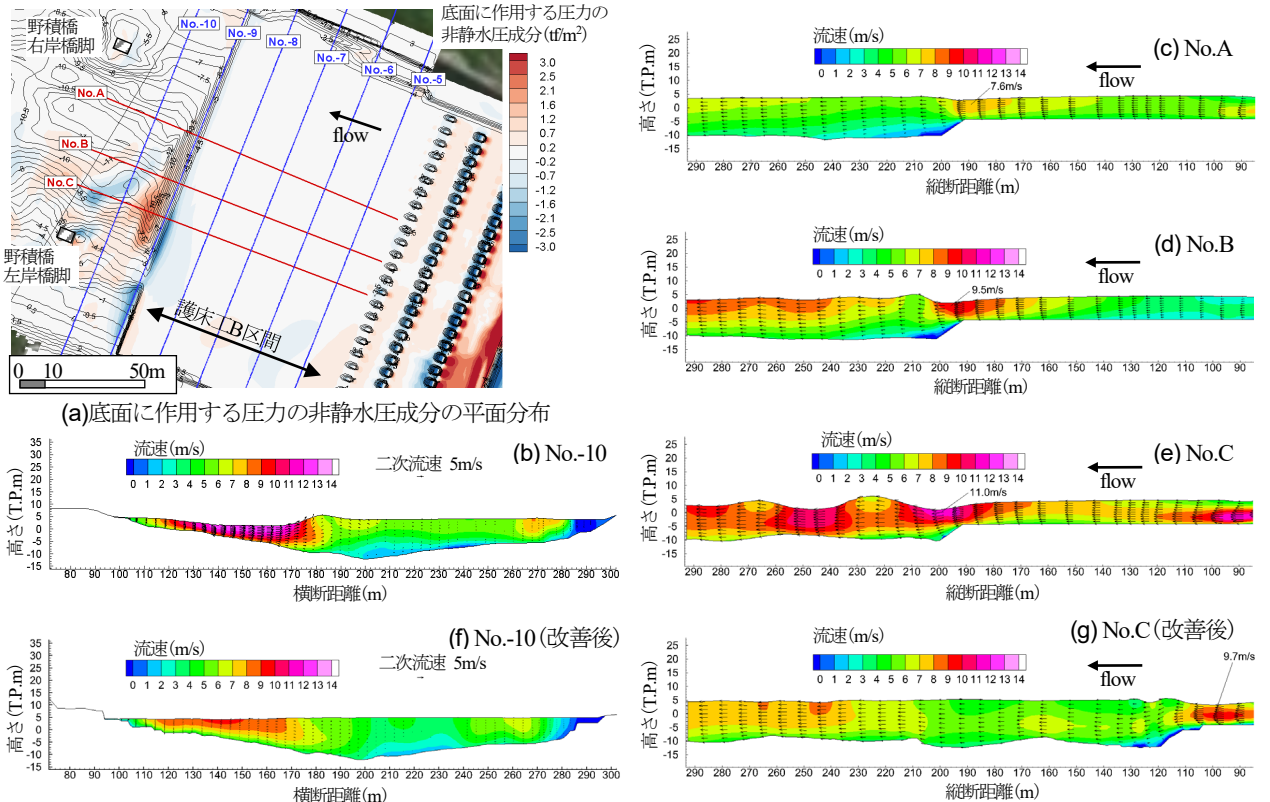


図-8 令和9年河道(Case3)の新第二床固周辺における底面に作用する圧力の非静水圧成分の平面分布と三次元流速分布

図-5と図-6は、現況河道と令和9年河道(Case3)の第二床固及び新第二床固周辺の地形と、流量 $9,800\text{m}^3/\text{s}$ 流下時の新第二床固周辺の洪水流況の解析結果を示している。図-5(a)に示すように、第二床固は円弧状の形状をしており、その影響を受けて現況河道では洪水流が河道中央部を集中して流れることになる(図-6(a))。これに対し、令和6年以降は、新第二床固及びバップルピアを有する護床工A区間の影響を受けて流れが横断方向に平滑化される(図-6(b))。その結果、新第二床固より下流区間では、河岸際の流速が現況河道に比べて増大する傾向にある。

新第二床固より下流区間では、右岸側に野積橋の橋台と地滑り対策のケーソンが設置されている。第1章で述べたように、新第二床固下流区間の河床には軟岩が露出しており、底面流速が 7m/s 以下の地点では河床の著しい侵食は確認されていない。このため、工作物の存在する河岸近傍で 7m/s 以上の流速が生じないか、水面流速、水深平均流速、底面流速の平面分布図を作成して検討した。その結果、表-2に示すように、左岸から新第二床固を構

築する令和9年(Case1)を除き、河岸付近の工作物付近で 7m/s 以上の流速は生じないことが確認された。

野積橋については、図-6(a)に示すように現況河道では右岸側の橋脚が主流域に存在しており、昭和57年に被災を受け復旧工事として六脚ブロックが投入されている。左岸側の橋脚は、主流域から離れており被災履歴はない。図-6(a),(b)に示すように、段階施工河道では、現況河道から主流の発生位置が大きく変化する。その結果、表-2に示すように右岸側の橋脚付近の底面流速は現況河道よりも低下する。一方、左岸側の橋脚は高流速に晒されるようになり、橋脚付近で 7m/s 以上の底面流速が発生し洗掘による被災の危険性が示唆された。特に、右岸から新第二床固の越流部を構築する令和9年河道(Case3)では図-7(b)に示すように、左岸側の橋脚付近で 9m/s 以上の底面流速が発生する結果になった。

(3) 護床工端部及び護床工直下流の深掘れ部における流況の変化

図-2(b)に示したように、令和6年から令和10年の間に現況河道の深掘れ部を埋め戻し、野積橋の直上流まで護床工B区間を段階的に建設することが検討されている。護床工B区間には異形ブロックを乱積し護床工の安定性を確保する予定であり、使用するブロックの規格等の検討にあたり、護床工端部で発生する流速・圧力の大きさを把握する必要がある。ブロックの規格は水深平均流速に基づき検討されることが多い。しかし、護床工端部では潜り噴流の発生等により主流が底面付近に生じ得るため、局所的に大きな流速が生じブロックが流出する恐れがある。また、護床工端部の流れは加速流となるため、ブロック表面の圧力が静水圧より低下し、ブロックに揚力が作用することになる。さらに、これまでの経緯から²⁾、護床工直下流の深掘れ部において、底面流速が現況河道よりも大きくなり、軟岩河床が洗掘され護床工の安定性を損ねることがないか懸念される。これらについて、図-8(a)に示す底面に作用する圧力の静水圧からの差分(非静水圧成分)の平面分布、図-8(a)の赤と青で示す縦横断測線での水位・流速分布を図-8(b)~(e)のように調べ検討した。図-8(a)のコンターは底面に作用する圧力の非静水圧成分、等高線は地盤高である。

表-2に示すように、護床工端部で発生する流速は最大で10m/s~12.5m/s程度になること、護床工端部ではブロック表面の圧力が静水圧から2~3tf/m²低下することを確認した。また、護床工直下流の深掘れ部における底面流速は、令和6年から令和10年のどの施工段階においても現況河道に比べて低下する。このため、護床工B区間の下流で河床洗掘が極端に進行し、護床工の安定性を損なう危険性は小さいものと考えられる。

(4) 段階施工計画の改善

まず、図-2に示した令和8年度と令和9年度の2ヶ年で行われる新第二床固越流部の構築手順について考察する。表-2に示すように、令和9年河道(Case1)の左岸から越流部を構築する場合は、右岸側の河岸際で7m/s以上の流速が発生し、地滑り対策のケーソン等への影響が懸念される。令和9年(Case2)の左右岸から越流部を構築する場合は施工の確実性に課題が残るため、新第二床固の越流部は、令和9年河道(Case3)に示す右岸側から構築するのが良いと考えられる。一方、新第二床固を右岸側から構築する場合は、表-2に示すように野積橋の左岸橋脚付近で9m/s以上の底面流速が生じることになる。

表-2に示すように、令和6年から令和8年にかけて護床工B区間を延伸するにつれて、野積橋の左岸橋脚付近の底面流速が増大する傾向が確認された。これは、護床工の建設のため、現況川幅のまま深掘れ部を埋め戻すと、護床工端部付近でフルード数(断面平均値)が0.8程度の流れが生じるためである。なお、将来的には山地掘削により川幅が約100m拡幅されるため、単位幅流量が大き

く減じ、護床工区間の流れは穏やかになることを数値解析及び水理模型実験から確認している。このため、現況河道部で工事が行われる令和10年までは、護床工B区間を建設せず、現況河道の深掘れ部を残し、そこで洪水流を減勢することにより、野積橋の左岸橋脚付近での底面流速の低減及び河道全体の流況改善が期待される。

図-7(c)と図-8(f),(g)は、護床工B区間の建設を令和10年まで行わない場合の令和9年河道の解析結果である。図-8(f),(g)に示すように現況河道の深掘れ部を残すことにより、新第二床固の下流区間では全体的に流況の改善が見られ、図-7(c)に示すように野積橋の左岸橋脚付近における底面流速増大の軽減が確認され、新第二床固の段階施工計画の改善に役立てられた。今後、現地観測や水理模型実験から本研究の成果を検証し、数値解析及び段階施工計画にフィードバックすることが重要である。

4. 結論

著者らは、大河津分水路の第二床固下流で蓄積されてきた洪水流による軟岩河床の侵食に関する知見と非静水圧準三次元解析に基づいて、令和6年から令和10年までの新第二床固の段階施工計画の改善について検討してきた。本論文では、その検討過程の詳細を提示することにより、数値解析技術の河川構造物の設計及び段階施工計画の検討に対する有効性を示した。

参考文献

- 1) 国土交通省 信濃川河川事務所：大河津分水路令和の大改修、https://www.hrr.mlit.go.jp/shinano/bunsui/about/pdf/pamph_2023.pdf (2024.3.26 閲覧)。
- 2) 常山修治, 小川正淳, 見田弘幸, 浅見和人, 保要牧央, 丸山友之, 福岡捷二：大河津分水路床止め工群改修の経緯と河床の安定化について、河川技術論文集, Vol.19, pp.93-98, 2013。
- 3) 竹村吉晴, 福岡捷二：洪水時の大河津分水路第二床固の流況再現技術—水理模型実験と数値解析による検討, 土木学会第69回年次学術講演会, CD-ROM, II-164, 2014。
- 4) 小瀨康正, 吉村綾子, 宮川勇二, 岡村誠司, 天野光歩, 福岡捷二：江戸川流頭部の河道計画の策定—先導的な数値解析を中心とした新しい河道設計技術—, 河川技術論文集, 第21巻, pp.153-158, 2015。
- 5) 竹村吉晴, 福岡捷二：波状跳水・完全跳水及びその減勢区間における境界面(水面・底面)上の流れの方程式を用いた非静水圧準三次元解析(Q3D-FEBS), 土木学会論文集B1(水工学), Vol.75, No.1, pp.61-80, 2019。

(2024. 4. 3受付)